

Выводы. В результате измерения по сравнению оригинального прибора с оптическим датчиком были выявлены некоторые зависимости (5). Соотношение микрометрического отклонения и зависимости осциллограммы имеет обратно-пропорциональную зависимость по осям CX и LX, в среднем по зависимости

$$L = 0,1 I = Lf \quad (5)$$

Таким образом, из [2] был взят прототип, который в настоящее время обрабатывается и видоизменен (рисунок 5). Основным элементом, упрощающим и удешевляющим прибор – поворотный стол. Данный стол имеет настройку угла поворота, периода, скорости, самое важное – бюджетную стоимость, что в целом удешевляет установку. Для улучшения фильтрации полученных данных необходимо применить кинематические уравнения и дополнить их динамическими

уравнениями вращательного движения твердого тела в системе координат, связанной с телом, и центр которой находится в центре инерции тела.

Литература

1. Гущина, Е. А. Цифровая метрология: учеб.-метод. Пособие / Е. А. Гущина, К. В. Епифанцев, Н. Ю. Ефремов. – СПб.: ГУАП, 2022. – 104 с.
2. Заякин О., А. Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности / О. А. Заякин, А. В. Манухин, А. А. Ростов // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 6. – С. 184–188.
3. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К. В. Епифанцев [и др.] // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 63–76.
4. Spragg, R. C. Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments / R. C. Spragg // Proc. Instr. Mech. Engrs, 1967–1968. – P. 32.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 621.373.8

ДВУХИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОКОЛИЧЕСТВ МЕТАЛЛОВ В ПОРИСТЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ

Ермалицкая К. Ф.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы возможности одноимпульсной и двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для микроанализа фрагментов почвы и остатков процесса переработки электродов автомобильных аккумуляторов с целью определения остаточного содержания металлических примесей. Экспериментально определены оптимальные параметры лазерных импульсов для увеличения чувствительности анализа, разработана методика количественного анализа пористых неметаллических образцов с микровключениями металлов.

Ключевые слова: Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, одиночные и двоянные лазерные импульсы.

DOUBLE-PULSE LASER SPECTROSCOPY OF MICRO AMOUNTS OF METALS IN POROUS NON-METALLIC MATRIXES

Ermalitskaia K.

*Belarussian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The possibilities of single-pulse and double-pulse laser atomic emission spectroscopy for microanalysis of soil fragments and residues from the recycling process of automobile battery electrodes in order to determine the residual content of metal impurities were investigated. The optimal parameters of laser pulses to increase the sensitivity of the analysis were experimentally determined, and a method for quantitative analysis of porous non-metallic samples with metal microinclusions was developed.

Key words: Laser atomic emission spectroscopy, single and double laser pulses.

*Адрес для переписки: Ермалицкая К. Ф., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ermalskaia@gmail.com*

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия широко применяется в последние десятилетия для анализа металлов и многокомпонентных сплавов. Однако высокая плотность лазерной мощности на поверхности образца вкупе с малым диаметром лазерного пучка (порядка 100–200 мкм) дает возможность предположить, что данный метод будет

эффективен и для прямого без механической и химической подготовки образца сканирования поверхности пористых неметаллических матриц.

Объектом исследования являлись образцы почв и пористые фрагменты, образовавшиеся после утилизации металлических электродов автомобильных аккумуляторов. При визуальном осмотре в образцах

можно выделить области различного цвета (светило и темно серые, зеленые, черные, светло и темно-красные), размеры которых могут не превышать 0,5–1 мм. Особый интерес представляет возможность сравнения концентраций металлических примесей в данных областях. Несмотря на заявленную высокую чувствительность лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, концентрации элементов определялись с точностью до единиц процентов – использовать дробные значения процентов неоправдано, так как концентрацию в разных точках отнесенных визуально к одному цвету может значительно отличаться.

Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр. Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС (производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС:

- источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов $f_{\text{л}} = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм;
- длительность импульсов $\tau_{\text{л}} \approx 10$ нс;
- межимпульсный интервал $\Delta t = 0\text{--}100$ мкс (шаг 1 мкс);
- диапазон анализируемых длин волн $\Delta\lambda = 260\text{--}760$ нм;
- энергия лазерного импульса $E_{\text{имп}} = 10\text{--}100$ мДж.

Специализированное программное обеспечение спектрометра ЛАЭМС позволяет задавать следующие параметры:

- режим одиночных (временной сдвиг между импульсами 0 мкс, т. е. оба импульса воздействуют на поверхность образца одновременно) и двояных лазерных импульсов (временной интервал между импульсами может изменяться в пределах от 1 до 100 мкс с шагом 1 мкс). Следует отметить, что при использовании ЛАЭМС переход от одиночных к двояным лазерным импульсам происходит без изменения суммарной энергии и мощности излучения;

- количество импульсов в точку, при этом можно дополнительно задавать количество импульсов преобжига – импульсов, которые воздействуют на поверхность перед основными, но спектр от них не регистрируется. Использование импульсов преобжига необходимо при исследовании образцов, поверхность которых покрыта видимыми загрязнениями, окислами, ржавчиной, патиной;

- энергию двояных лазерных импульсов и частоту их следования;

- программное обеспечение позволяет перемещать предметный столик с закрепленным образцом в двух плоскостях (вверх-вниз, влево-вправо).

Объекты исследования. Были отобраны 4 образца, отличающиеся внешне, на каждом из образцов было выбрано несколько мест, где проводился лазерный анализ – так, например, в образце

№ 1 визуально можно выделить зеленоватый край толщиной порядка 1 мм, потом прослойку серого цвета, толщиной 2 мм, рыжую полосу толщиной 1 мм и объемную область белого цвета в центре. На первом этапе был проведен качественный анализ – были выявлены основные элементы, присутствующие в каждой точке каждого образца, затем был проведен количественный анализ. Для количественного анализа разрабатывались эталоны с использованием различных типов легкоплавких сплавов (ПОС40, ПОС60, сплав Розе, сплав Вуда, ПОС 90), с последующих их растворением и нанесением на различного типа пористые матрицы (мел, графит, необожженная керамика).

Результаты и обсуждение. Экспериментально было определено, что при лазерной абляции пористых неметаллических матриц с помощью одиночных лазерных импульсов относительная интенсивность спектральных линий металлических включений превышает уровень фона всего в 1,5–2 раза, что не позволяет использовать данный режим для качественного и количественного анализа. При переходе к двухимпульсной лазерной абляции при неизменной суммарной энергии и мощности излучения интенсивность спектральных линий возрастает в 5–7 раз. Оптимальным значением временного интервала между двояными лазерными импульсами является 8 мкс для всех обнаруженных металлов: меди, железа и олова. Результаты количественного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание компонентов в неметаллических пористых матрицах, определенное методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии

Образец	Цветная область	Ca	Cu	Fe	Sn
		Концентрация, %			
№ 1	Зеленая	79	4	4	13
	Белая	70	4	4	22
	Рыжая	10	10	9	71
	Серая	84	3	4	8
№ 2	Внешняя серая	71	3	10	15
	Зеленая	1	7	8	84
	Красная	23	6	9	61
	Серая	2	7	6	84
№ 3	Светло серая	38	4	1	57
	Темно серая	70	4	0	26
	Черная	59	4	2	35
№ 4	Светло серая	38	4	1	57
	Темно серая	69	4	1	26
	Черная	59	4	2	35
	Светло красная	37	5	6	52
	Светло серая	59	4	7	31
	Темно красная	0	4	6	90
	Темно серая	47	6	13	34

Выводы. На основании проведенных исследований по лазерной атомно-эмиссионной

спектроскопии природных объектов можно сделать следующие выводы:

1. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является преимущественным методом прямого малодеструктивного анализа металлов и сплавов. Несмотря на то, что данный метод можно использовать для анализа неметаллических матриц, следует отметить, что спектры, получаемые в таких условиях, обладают меньшей интенсивностью по сравнению с чистыми металлами. Это связано с различиями в физических и химических свойствах материалов, влияющих на эффективность ионизации и испускание света. Также хорошо применим для поскольку позволяет проводить измерения в конкретной точке поверхности в атмосфере воздуха без предварительной химической и механической подготовки поверхности.

2. Были определены оптимальные параметры лазерного двухимпульсного лазерного атомно-эмиссионного анализа неметаллических матриц (8 мкс).

3. Переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции образцов почв приводит к увеличению относительной интенсивности спектральных линий металлических примесей в 5–7 раз, что на порядок ниже, чем при абляции образцов чистых металлов.

4. Визуально отличающиеся цветные области в фрагментах загрязненных почв имеют разную концентрацию примесей: железа, олова и меди.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

УДК 535.312:535.016

АНТИБЛИКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Жукова М. Н., Парфимович И. Д., Комаров Ф. Ф., Филиппович В. Ю.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано воздействие низкоэнергетической кислородной плазмы на композиционный материал на основе эпоксидного полимера, наполненного многостенными углеродными нанотрубками, используемого в качестве антибликового. В полете космические аппараты, функционирующие в околоземном космическом пространстве, подвергаются воздействию множества факторов космического пространства: потоков высокоэнергетических электронов и ионов, кислородной плазмы, солнечного излучения, метеорных частиц. В результате такого воздействия возникают различные физико-химические процессы в материалах и элементах оборудования, что приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, композиционные материалы, эпоксидный полимер, кислородная плазма, антибликовые покрытия.

ANTI-REFLECTIVE COMPOSITE COATINGS FOR PROTECTION OF OPTICAL AND OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF SPACECRAFTS

Zhukava M., Parfimovich I., Komarov F., Filippovich V.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The effect of low-energy oxygen plasma on a composite material based on epoxy polymer filled with multi-walled carbon nanotubes used as an anti-reflective material has been studied. In flight, spacecraft operating in near-Earth space are exposed to a variety of space factors: flows of high-energy electrons and ions, oxygen plasma, solar radiation, and meteor particles. As a result of such impact, various physical and chemical processes occur in materials and equipment elements, which leads to deterioration of their operational characteristics.

Key words: carbon nanotubes, composite materials, epoxy polymer, oxygen plasma, anti-reflective coatings.

Адрес для переписки: Жукова М. Н., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: maryliss.lab@gmail.com

Методика эксперимента. В настоящей работе рассмотрен метод структурирования поверхности материала для создания антиотражающих покрытий посредством использования кислородной плазмы.

Использование многостенных углеродных нанотрубок (УНТ) обусловлено эффективными поглощающими свойствами углеродных нано-

структур и возможностью формировать в полимере объемные поглощающие структуры [1], а также невысокой стоимостью относительно стоимости одностенных УНТ.

Композитный материал формировался на основе полимерной безусадочной эпоксидной смолы торговой марки ЭД-20. В качестве наполнителя использовались углеродные нанотрубки